УДК 621.373.826:004.662.5

ЗАЖИГАНИЕ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТАВА (ПЕРХЛОРАТ АММОНИЯ + УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЙ АЛЮМИНИЙ) ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

В.В. Медведев, В.П. Ципилев, А.А. Решетов*

Томский политехнический университет
*ГНУ «НИИ ВН при ТПУ». г. Томск
E-mail: medvedev@tpu.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований по зажиганию пиротехнического состава (перхлорат аммония + ультрадисперсный алюминий) лазерным излучением (λ=1,06 мкм) при различных длительностях лазерных импульсов (4, 2, 0,8 мс, 80 мкс, 30 нс). Измерены пороги и задержки зажигания. Предлагается один из возможных механизмов лазерного воспламенения исследуемого состава.

Известно [1–4], что инициирующие и вторичные взрывчатые вещества (ВВ) при определенных условиях достаточно легко воспламеняются и детонируют под действием лазерного излучения в области спектра, где ВВ прозрачно, т.е. в условиях слабого поглощения, В то же время зажигание вторичных ВВ с открытой поверхностью образца крайне затруднено. Для описания процесса инициирования первичных и вторичных ВВ принята тепловая очаговая модель зажигания. Поэтому представляет интерес исследование зажигания энергетических веществ, в которых реализуются условия достаточно сильного поглощения и, соответственно, облегчаются условия создания тепловых очагов с достаточно высокой начальной температурой. Исходя из этого, следует ожидать снижения энергетических порогов зажигания поглощающих сред по сравнению с прозрачными ВВ.

1. Методика эксперимента

В данной работе экспериментально исследовано зажигание в атмосфере воздуха смесевого состава [перхлорат аммония (ПХА) + ультрадисперсный алюминий (УДА), взятыми в стехиометрическом соотношении] лазерным излучением (ЛИ) (λ=1,06 мкм) в

широком диапазоне длительностей лазерных импульсов ($\tau_и$=4; 2; 0,8 мс; 80 мкс; 30 нс). Предварительно ПХА квалификации «чда» измельчался в агатовой ступке и просеивался через капроновое сито со средним размером ячеек ~85×85 мкм.

Ультрадисперсный порошок алюминия получен электрическим взрывом (напряжение 26 кВ, емкость конденсатора 2,4 мкФ, отношение энергии взрыва к энергии сублимации – 1,6) алюминиевых проводников диаметром 0,35 и длиной 80 мм в среде аргона квалификации «о.с.ч.» при давлении 2,5 атм. Средний диаметр частиц составлял 0,25 мкм, содержание активного алюминия – не более 93 мас. %, форма частиц сферическая, распределение частиц по размерам подчиняется нормально-логарифмическому закону [5]. Полученные порошки имеют пониженную рентгеновскую плотность, которая соответствует плотности алюминия, нагретого на десятки градусов. Реакционная способность таких частиц может быть повышенной [6].

Смесь массой ~6 мг засыпалась в капсулу из полиметилметакрилата с внутренним диаметром 2 и глубиной 5 мм (рис. 1). Навески запрессовывались пуансоном в капсулу до давления 400 кГс/см^2. Облучалась вся торцевая поверхность образцов, как открытая (рис. 1, *а*), так и под прикрытием (рис. 1, *б*).

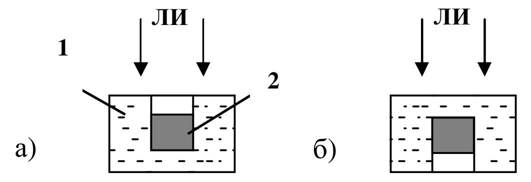


Рис. 1. *Схема облучения образцов лазерным излучением (ЛИ): 1) капсула; 2) образец*

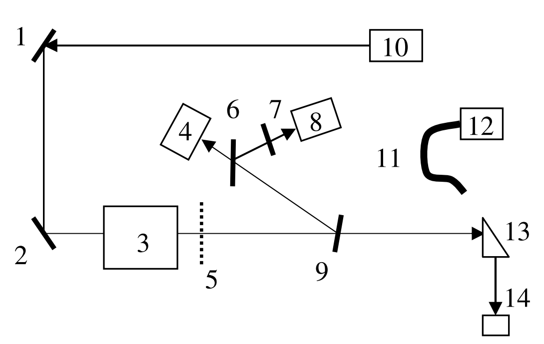


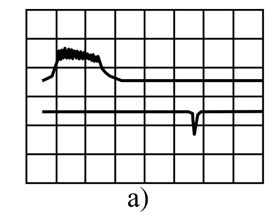
Рис. 2. *Схема установки зажигания пиротехнической смеси импульсным лазером с миллисекундной длительностью импульса: 1, 2) поворотные зеркала, 3) импульсный лазер, 4) калориметр, 5, 7) нейтральный светофильтр, 6, 9) светоделительная пластина, 8) фотоприемник ФЭК-09К, 10) юстировочный лазер ЛГН-109, 11) световодный жгут, 12) фотоприемник ФЭУ-118, 13) поворотная призма, 14) образец*

Использовалось излучение двух неодимовых лазеров. Первый генерировал квазипрямоугольный, квазинепрерывный (глубина модуляции не более 30 %) лазерный импульс длительностью 4; 2; 0,8 мс; 80 мкс (многомодовый режим генерации). Второй лазер – импульс длительностью 30 нс (одномодовый режим генерации). Неравномерность засветки облучаемой по нормали торцевой поверхности образца составила не более 20 %. Схема экспериментальной установки при воздействии лазера с миллисекундной длительностью импульса приведена на рис. 2.

Подробнее лазерные установки описаны в работах [1, 7]. Пороги зажигания определялись следующим образом. Вначале строились вероятностные кривые зажигания на интервале от 0 до 100 % (количество зажиганий/количество опытов), как функция от плотности энергии E падающего излучения при заданных длительностях импульса ЛИ. Каждой точке кривой соответствовала статистика из 25 опытов с разбросом показаний калориметра не более 10 % от среднего значения. За порог зажигания принимались значения E_{50}, при которых реализовалось 50 %-ное зажигание.

2. Результаты эксперимента

Эксперименты показали, что при воздействии импульса миллисекундной длительности образцы хорошо зажигаются как с открытой поверхностью, так и под прикрытием (рис. 1). Образцы с открытой поверхностью вспыхивали без звука и быстро сгорали, демонстрируя яркий факел высотой более 10 см. В продуктах выброса наблюдались агломерированные частицы алюминия диаметром до 125 мкм и частицы оксида алюминия. Для этой цели, параллельно торцу образца, на расстоянии 10 мм, помещалась стеклянная пластина, на которую осаждались частицы. Наблюдение велось с помощью микроскопа МБС-9. Под прикрытием смеси с некоторой вероятностью или взрывались, или беззвучно сгорали во время или после воздействия ЛИ (рис. 3).



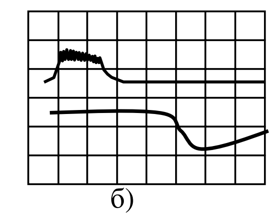


Рис. 3. *Типичные осциллограммы при воздействии ЛИ на пиротехнические смеси: развертка 0,5 мс/дел, верхний луч – лазерный импульс, нижний – световой сигнал из приповерхностного пространства образца. Образец: а) взорвался; б) сгорел*

При уменьшении длительности лазерного импульса пороги зажигания уменьшались (см. таблицу).

Таблица. *Величина порога (E_{50}) и задержки зажигания ($\tau_з$) при разных длительностях ЛИ*

Условия облучения	$\tau_и$	E_{50}, Дж/см^2	$\tau_з$, мс
Открытая поверхность (рис. 1, *а*)	4 мс	0,94	4,5
	2 мс	0,80	4,5
	0,8 мс	0,56	4,2
	80 мкс	0,18	2,6
	30 нс	1,45	2,0
Под прикрытием (рис. 1, *б*)	4 мс	6,00	3,5
	2 мс	2,90	1,6
	0,8 мс	2,03	0,7
	80 мкс	0,76	0,6
	30 нс	0,44	0,3

По данным таблицы построены кривые зависимости величины порога зажигания от длительности лазерного импульса (рис. 4). Отмечается большой разброс задержки зажигания в интервале E, в котором строились вероятностные кривые зажигания. При плотностях энергии ЛИ, превышающих E_{50} более чем в два раза, временной разброс и задержка зажигания уменьшались (рис. 5).

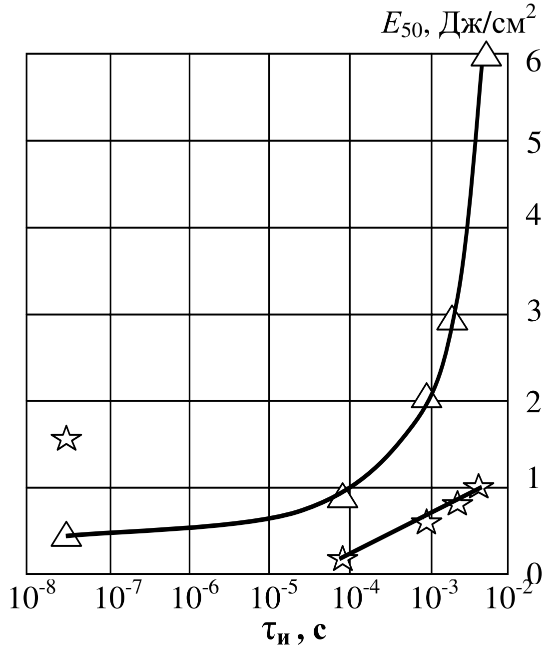


Рис. 4. *Зависимость порога зажигания от длительности лазерного импульса. Треугольниками обозначены экспериментальные точки, когда поверхность образца находится под прикрытием; звездочками – открытая поверхность*

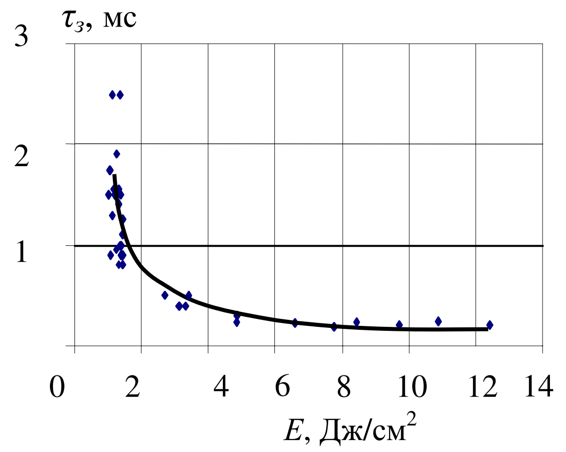


Рис. 5. *Зависимость задержки зажигания от плотности энергии ЛИ. Длительность лазерного импульса 0,8 мс, образец под прикрытием*

Обсуждение результатов

Прежде всего, обращает на себя внимание тот факт, что в области больших длительностей ЛИ ($\tau_и>10^{-4}$ с) наблюдается увеличение порогов зажигания с ростом $\tau_и$. Возможное объяснение такой зависимости может быть связано с зажиганием, происходящим в результате нагрева объема, ограниченного диаметром лазерного пучка и глубиной проникновения излучения. В пренебрежении диффузным рассеянием средняя температура прогрева в адиабатических условиях равна $T=E\cdot\mu/c\rho+T_x$, где E – пороговая плотность энергии; μ – показатель поглощения состава; c – удельная теплоемкость; ρ – удельная плотность; T_x – температура, обусловленная экзотермической реакцией. В таких условиях тепловой очаг превращается в очаг горения и взрыва.

Совсем другая ситуация возникает в случае, когда процесс создания и развития теплового очага сопровождается интенсивным газовыделением или отводом тепла за счет теплопроводности, т.е. присутствуют релаксационные процессы. Последние характеризуются пространственно-временными масштабами, зависящими от структуры вещества (прессованный, насыпной) и конструкции сборки. Очевидно, что чем больше характерное время тепловой разгрузки очага $\tau_{рел}$, тем лучше условия его развития в очаг горения и взрыва.

В условиях наших опытов, когда поверхность прессованных образцов прикрыта прозрачным диэлектриком, газоотвод с поверхности ограничен. Основным механизмом отвода тепла в данном случае является теплопроводностный с характерным тепловым пробегом $(a\tau_и)^{1/2}$, где a – температуропроводность. Принимая из рис. 4 $\tau_{рел}$ равным ~10^{-3} с, можно оценить пространственный релаксационный масштаб как $(a\tau_{рел})^{1/2}$~10^{-2} см ~$1/\mu$ (a~10^{-1} см^2/с) и проанализировать экспериментальную ситуацию.

В области малых длительностей лазерного импульса за время его воздействия ($\tau_и<<\tau_{рел}$) разгрузкой очага можно пренебречь, и его развитие определяется запасом тепла независимо от скорости энерговклада. В этом диапазоне длительностей ЛИ критерием инициирования зажигания является плотность энергии E в лазерном пучке. Необходимое условие такого критерия можно записать в виде: $(a\tau_{рел})^{1/2}<1/\mu$.

В области больших длительностей скорость теплоотвода играет решающую роль в процессе развития очага. Для устойчивого зажигания необходимо некоторое превышение скорости энерговклада над скоростью теплоотвода, поэтому критерием зажигания является плотность мощности излучения с соответствующим условием $\tau_и>\tau_{рел}$.

При воздействии ЛИ на открытую поверхность в режиме короткого моноимпульса пороги зажигания оказались несколько выше, чем ожидалось. Это повышение, по-видимому, обусловлено влиянием экранировки ЛИ эрозионным факелом. Возможно, что механизм зажигания несколько иной, например, за счет оптического пробоя в приповерхностной области образца. Нельзя исключать из рассмотрения роль оптического пробоя и при зажигании в условиях закрытой поверхности.

В области больших длительностей пороги зажигания образцов с открытой поверхностью ниже порогов зажигания образцов под прикрытием. По-

видимому, в условиях относительно медленного нагрева очага газовая фаза способствует его зажиганию за счет химических экзотермических реакций ультрадисперсного алюминия с азотом и кислородом воздуха, поскольку исследования процессов окисления УДА на воздухе [6] показали, что для него характерна низкая температура зажигания 250...450 °С. При этом реакция идет как с кислородом с образованием оксида алюминия, так и с азотом с образованием нитрида алюминия. Тем не менее, более высокая чувствительность открытых образцов указывает на то, что основная реакция разложения происходит в конденсированной фазе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Е.И., Ципилев В.П. Размерный эффект при инициировании азида свинца лазерным моноимпульсным излучением // Физика горения и взрыва. – 1981. – Т. 17. – № 5. – С. 77–81.
2. Александров Е.И., Вознюк А.Г., Ципилев В.П. Влияние поглощающих примесей на зажигание ВВ лазерным излучением // Физика горения и взрыва. – 1989. – Т. 25. – № 1. – С. 3–9.
3. Карабанов Ю.Ф., Афанасьев Г.Г., Боболев В.К. Зажигание вторичных ВВ коротким импульсом ОКГ // Горение конденсированных систем. – Черноголовка, 1977. – С. 5–8.
4. Таржанов В.И., Зинченко А.Д., Сдобнов В.И. и др. Лазерное инициирование тэна // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32. – № 4. – С. 113–119.
5. Яворовский Н.А. Получение ультрадисперсных порошков методом электрического взрыва // Известия вузов. Физика. – 1996. – № 4 (Приложение). – С. 114–136.
6. Ильин А.П., Громов А.А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. –Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 154 с.
7. Медведев В.В. Лазер с регулируемой длительностью импульса на базе серийного о.к.г. ГОС-301 // Приборы и техника эксперимента. – 2000. – № 6. – С. 89–91.

УДК 621.039.532.21